

ISSN 1411-240X
Nomor : 266/AU1/P2MBI/05/2010

Analisis dan Optimasi Desain Sistem
(Mohammad Dhandang Purwadi)

ANALISIS DAN OPTIMASI DESAIN SISTEM REAKTOR GAS TEMPERATUR TINGGI RGTT200K DAN RGTT200KT

Mohammad Dhandang Purwadi
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN
Email: dhan@batan.go.id, m.dhandhang.purwadi@gmail.com

Diterima editor 14 November 2011
Disetujui untuk publikasi 20 Desember 2011

ABSTRAK

ANALISIS DAN OPTIMASI SISTEM REAKTOR GAS TEMPERATUR TINGGI RGTT200K DAN RGTT200KT. Berdasarkan amanat Perpres No.5/2010, PTRKN-BATAN mengembangkan desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi berbasis Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT) yang diberi nama RGTT200K dan RGTT200KT. Desain sistem kedua varian RGTT ini belum optimal dan spesifikasi *thermal-flow* dari kedua teras reaktor berbeda. Seharusnya desain konseptual sistem RGTT200K maupun RGTT200KT mempunyai spesifikasi *thermal-flow* teras reaktor yang sama, sehingga tidak perlu mendesain dua teras reaktor dengan geometri teras dan bahan bakar yang berbeda. Untuk memenuhi persyaratan tersebut dalam penelitian ini dilakukan analisis dan optimasi terhadap desain konseptual sistem RGTT200K dan RGTT200KT dengan tujuan meningkatkan faktor utilisasi energi termal (EUF) dan menyatukan spesifikasi *thermal-flow* teras reaktor. Analisis sistem RGTT200K dan RGTT200KT dilakukan dengan perangkat lunak Cyclepad. Metode volume kendali tetap satu dimensi digunakan dalam Cyclepad untuk menyelesaikan persamaan konservasi dalam volume kendali, oleh karena itu Cyclepad sangat sesuai untuk melakukan desain konseptual sistem siklus termodinamika. Optimasi dilakukan dengan penyelesaian persamaan aljabar linier dari model RGTT200K dan RGTT200KT. Dari analisis dan optimasi ini dihasilkan desain konseptual sistem RGTT200K dan RGTT200KT dengan spesifikasi *thermal-flow* teras sama, dan peningkatan EUF dari 63% menjadi 80,14% (untuk RGTT200K) dan dari 63,6% menjadi 78,02% (untuk RGTT200KT).

Kata kunci: RGTT, Reaktor Daya Maju, Sistem Kogenerasi, Produksi Hidrogen, Desalinasi

ABSTRACT

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE RGTT200K AND RGTT200KT HIGH TEMPERATUR GAS-COOLED REACTOR SYSTEMS. Based on the mandatory of the Presidential Regulation No.5/2010, PTRKN-BATAN developing the conceptual design of cogeneration advanced power reactor based on High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGR), those are named as RGTT200K and RGTT200KT. The design of the two variants RGTT system is not optimal yet and the thermal-flow specifications of both reactor cores are difference. Conceptual design of the RGTT200K and RGTT200KT systems should have the same thermal-flow core specifications, therefore no need to design two cores with different geometry of the core and fuel. To meet these requirements, the analysis and optimization of the conceptual design of RGTT200K and RGTT200KT system were performed in order to improve energy utilization factor (EUF) and unify the thermal-flow specifications of the reactor cores. Cyclepad software was used in the analysis of RGTT200K and RGTT200KT systems. The one dimension fixed control volume method is used in Cyclepad to solve the conservation equations that formulated for the control volume, therefore Cyclepad is very suitable for conceptual design of the thermodynamic cycle system. Optimization was carried out by solving of rising linear algebra equation of the RGTT200K and RGTT200KT models. This analysis and optimization resulting in the conceptual design of RGTT200K and RGTT200KT systems with same thermal-flow specification for the reactor cores, and an increase in EUF to the level of 80.14% from 63% (for RGTT200K), and 78.02% from 63.6% (for RGTT200KT).

Keywords: HTGR, Advanced Power Reactor, Cogeneration System, Hydrogen Production, Desalination

PENDAHULUAN

Berdasar amanah dalam Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2010[1] tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah 2010-2014, Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN)-BATAN mengembangkan dua desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi berbasis Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT) yang diberi nama RGTT200K[2] dan RGTT200KT[3]. RGTT200K adalah sistem reaktor kogenerasi dengan siklus Brayton langsung dan RGTT200KT dengan siklus Brayton tak langsung. Kedua desain RGTT ini dirancang untuk sistem kogenerasi dengan fungsi sebagai pembangkit daya listrik, proses produksi gas hidrogen termokimia dan proses desalinasi dengan *multi-stage flashing* (MSF).

Desain konseptual sistem RGTT200K dan RGTT200KT yang dikembangkan oleh PTRKN-BATAN belum optimal, faktor utilisasi energi termal (*Energy Utilization Factor*, EUF) untuk kedua desain ini masih berkisar pada kisaran angka 60%, yaitu 63% untuk RGTT200K [2] dan 63,6% untuk RGTT200KT [3]. Selain itu, spesifikasi *thermal-flow* (misalnya, temperatur pendingin masuk dan keluar teras, laju alir massa, perubahan entalpi dan entropi pendingin) untuk kedua teras reaktor nuklir masih berbeda. Keduanya mempunyai kesamaan spesifikasi hanya dalam hal pembangkitan daya termal (200 MWt) dan temperatur luaran pendingin helium (950°C). Perbedaan ini akan mempersulit tindak lanjut dalam perancangan teras reaktor nuklir. Dalam konsep perancangan teras reaktor daya maju kogenerasi yang modular, sedapat mungkin satu desain teras reaktor dapat dipakai untuk berbagai varian desain sistem RGTT200x, sehingga tidak perlu merancang teras reaktor dengan beberapa bentuk geometri teras dan bahan bakarnya. Tantangan menyamakan spesifikasi *thermal-flow* reaktor tidak sederhana, karena perubahan parameter dalam reaktor akan mengubah kinerja seluruh komponen sistem sehingga spesifikasi komponen menjadi tidak lazim dan jauh dari standar atau kode yang ada. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis dan optimasi seksama untuk mendapatkan desain sistem RGTT200K maupun RGTT200KT, yang memiliki spesifikasi *thermal-flow* teras reaktor yang sama dan EUF sistem mendekati kisaran angka 80%.

Dalam penelitian ini dilakukan analisis desain sistem RGTT200K dan RGTT200KT menggunakan perangkat lunak Cyclepad. Cyclepad adalah perangkat lunak yang banyak digunakan untuk desain konseptual dan optimasi desain sistem siklus termodinamika[4-7]. Pemodelan komponen sistem dalam Cyclepad dilakukan dengan menggunakan pendekatan metode kendali volume tetap (*fixed control volume method*). Setiap komponen sistem dimodelkan sebagai satu volume kendali tetap, dengan persamaan konservasi massa dan energi yang berlaku di dalamnya. Penyelesaian persamaan konservasi dalam volume kendali tetap dilakukan dengan pendekatan satu dimensi (1-D), serta dengan mempertimbangkan proses termodinamika yang cocok (misalnya, proses isothermal, isokhorik, isobaris, isentropis, adiabatik, politropik, dan lain-lain). Penyelesaian persamaan konservasi massa dan energi dengan pendekatan satu dimensi sangat sesuai untuk analisis dan optimasi terhadap desain konseptual sistem siklus termodinamika, karena penyelesaian persamaan dapat didekati dengan persamaan aljabar sederhana. Validasi perangkat lunak Cyclepad, dilakukan dengan analisis dan perhitungan sistem GTHTR300 yang didesain oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI)[8].

Sistem RGTT200K dan RGTT200KT optimal yang diperoleh akan dijadikan pedoman untuk proses desain konseptual komponen sistem selanjutnya, yaitu desain konseptual teras reaktor, desain konseptual sistem konversi energi dan desain konseptual sistem keselamatan.

DASAR TEORI

Analisis dan optimasi terhadap desain konseptual sistem RGTT200K dan RGTT200KT dilakukan dengan memodelkan diagram alir sistem dalam perangkat lunak Cyclepad. Cyclepad dikembangkan untuk pengembangan desain konseptual suatu siklus termodinamika. Perangkat lunak ini hanya mampu menghitung pemodelan kondisi tunak (*steady state*), walaupun demikian Cyclepad memberikan opsi fasilitas studi sensitivitas untuk mengamati kinerja sistem bila salah satu parameter sistem mengalami perubahan. Analisis sensitivitas sangat penting untuk mendapatkan kondisi optimal dari neraca massa dan energi sistem pada tahapan pengembangan desain konseptual suatu siklus. Cyclepad dilengkapi dengan data gas pendingin yang biasanya digunakan sebagai medium kerja suatu siklus termodinamika.

Persamaan Konservasi Dalam Volume Kendali

Metode volume kendali tetap (*fixed control volume*) digunakan dalam Cyclepad, komponen sistem dimodelkan dengan suatu volume kendali (*control volume*), dan persamaan konservasi dalam volume kendali diselesaikan dengan pendekatan geometri satu dimensi. Berikut ini adalah penjabaran persamaan konservasi yang diselesaikan dalam perangkat lunak Cyclepad.

Persamaan konservasi massa untuk volume kendali tetap yang didekati dengan menggunakan pendekatan aliran satu dimensi dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut.

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i v_i)_{out} - \sum_j (\rho_j A_j v_j)_{in} = 0 \quad (1)$$

Seluruh parameter dalam persamaan (1), terkait dengan sifat medium kerja yang dipakai dalam siklus sistem varian RGTT200x (RGTT200K dan RGTT200KT), yaitu gas helium. Dalam persamaan tersebut parameter ρ , V , A , v dan t masing-masing adalah densitas, volume, luas penampang saluran masuk (*inlet*) atau keluar (*outlet*), kecepatan medium kerja dan waktu. Subskrip CV dalam suku integral menunjukkan bahwa integrasi dilakukan untuk seluruh volume kendali (*control volume*). Sedangkan subskrip *out* dan *in* menunjukkan parameter pada saluran keluar (*outlet*) dan saluran masuk (*inlet*) pada volume kendali.

Persamaan (2) berikut ini menggambarkan prinsip konservasi energi dalam volume kendali tetap. Persamaan ini sesungguhnya merupakan bentuk integral dari hukum termodinamika ke satu yang dapat diberlakukan dalam suatu volume kendali.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{CV} \left(u + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) \rho dV \right] + \sum_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gz_i \right)_{out} \cdot \dot{m}_{out} - \sum_j \left(h_j + \frac{1}{2} v_j^2 + gz_j \right)_{in} \cdot \dot{m}_{in} \quad (2)$$

\dot{Q} , \dot{W} , u , g , z dan h pada persamaan ini menunjukkan laju aliran energi panas, kerja, energi dalam, percepatan gravitasi, posisi ketinggian dan entalpi.

Proses Termodinamika Dalam Volume Kendali [9]

Varian sistem RGTT200x menggunakan siklus Brayton untai tertutup dengan medium kerja gas helium. Siklus Brayton untai tertutup mempunyai empat proses termodinamika, yaitu pemanasan, ekspansi, pendinginan dan kompresi. Dalam proses pemanasan atau pendinginan biasanya digunakan pemanas atau alat penukar kalor (*heat exchanger*). Volume kendali tetap yang digunakan dalam pemodelan varian sistem RGTT200x mengimplementasikan semua proses termodinamika tersebut. Apabila setiap proses diwakili oleh satu komponen sistem, maka setiap komponen sistem harus dimodelkan sebagai volume kendali, dan persamaan konservasi massa dan energi harus diberlakukan padanya. Proses termodinamika mempunyai beberapa kondisi sifat, diantaranya adalah isothermal, isokhorik, isobarik, isentropik, adiabatik dan politropik. Sifat ini diberlakukan

pada setiap volume kendali sesuai dengan proses nyata yang terjadi dalam komponen sistem yang diwakili oleh volume kendali tersebut.

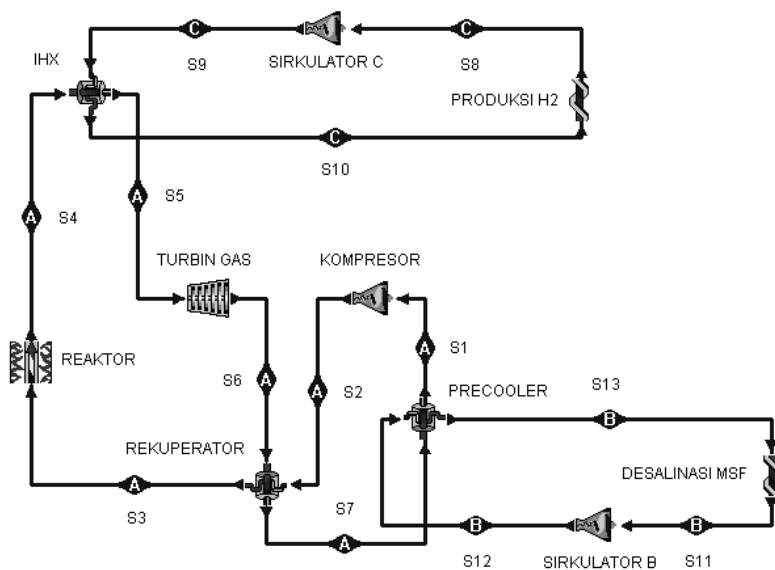
Untuk analisis dan optimasi desain sistem varian RGTT200x, proses pemanasan siklus Brayton dilakukan dalam teras reaktor nuklir dengan kondisi non-isobarik. Proses ekspansi terjadi dalam turbin gas satu *stage* dengan kondisi non-isentropik. Turbin gas dikopel satu poros dengan kompresor di mana proses kompresi terjadi, kondisi proses kompresi adalah sama dengan proses ekspansi, yaitu non-isentropik. Proses pendinginan dilakukan sebelum medium kerja dikompresi dalam kompresor, dengan kondisi non-isobarik.

METODOLOGI

Analisis dan optimasi desain sistem varian RGTT200x dilakukan dengan perangkat lunak Cyclepad yang dikembangkan oleh Universitas Northwestern dan Universitas Oxford. Perangkat lunak ini banyak digunakan untuk desain dan optimasi terhadap desain konseptual sistem siklus termodinamika[4-7]. Berikut ini diuraikan detail dari tata cara (metodologi) pemodelan sistem varian RGTT200x yang telah dilakukan dalam penelitian ini.

Pemodelan Sistem RGTT200K dan RGTT200KT Dengan Cyclepad

Setiap komponen dalam sistem varian RGTT200x dimodelkan sebagai volume kendali (*control volume*), dan pada setiap volume kendali, pada sisi masukan (*input*) dan luaran (*output*) terdapat *node*, yang berisikan kondisi termodinamika medium kerja (gas helium).

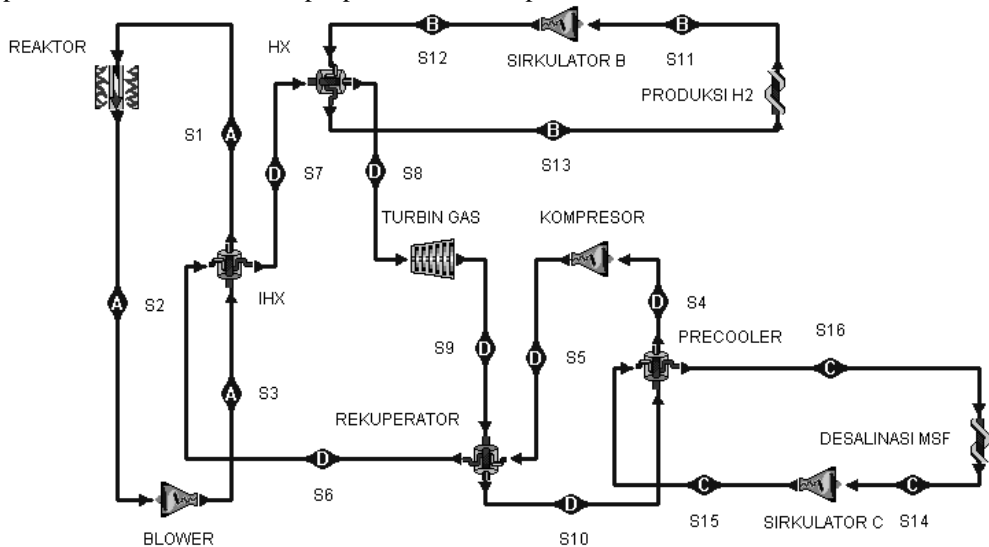


Gambar 1. Model RGTT200K dalam Cyclepad

Model untuk desain konseptual RGTT200K dalam perangkat lunak Cyclepad ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem RGTT200K adalah sistem dengan siklus Brayton langsung yang dimanfaatkan secara kogenerasi untuk produksi gas hidrogen, pembangkitan listrik dan produksi air bersih melalui proses desalinasi MSF. Dalam model RGTT200K terdapat sepuluh buah komponen, yaitu: reaktor, *Intermediate heat exchanger* (IHX), turbin-

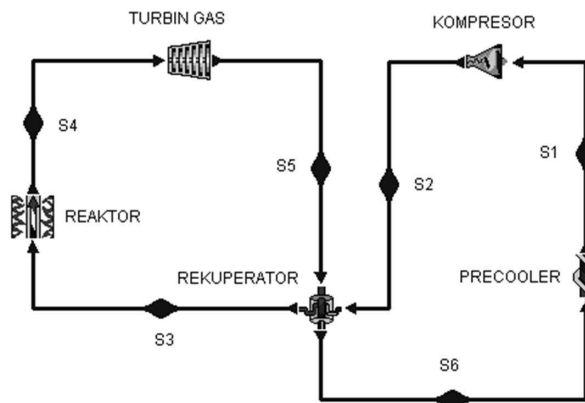
gas, rekuperator, kompresor, irkulator B, sirkulator C, *precooler*, unit produksi gas hidrogen dan unit desalinasi MSF. Pos turbin dan kompresor terkoneksi membentuk sistem turbin-kompresor satu poros, dan pada poros ini juga dikoneksikan generator listrik. Panas sisa yang akan dibuang ke lingkungan melalui *precooler* dimanfaatkan untuk proses desalinasi dengan teknologi MSF. Selain sepuluh komponen, dalam model RGTT200K terdapat tiga belas buah *node* (S1-S13). Model mempunyai tiga untai, yaitu untai utama A, B dan C. Untai C dirancang untuk fasilitas unit produksi hidrogen, dan untai B untuk unit desalinasi MSF. Untai A merupakan untai utama sistem pembangkit daya listrik yang bekerja berdasarkan siklus Brayton.

RGTT200KT adalah desain konseptual reaktor gas temperatur tinggi untuk kogenerasi dengan siklus Brayton tak-langsung. Pengembangan sistem RGTT200KT dengan siklus Brayton tak-langsung ditujukan untuk meningkatkan faktor keselamatan operasi maupun perawatan, walaupun dengan konsekuensi penurunan aspek ekonomi karena adanya penurunan efisiensi dan terdapat penambahan komponen.



Gambar 2. Model RGTT200KT dalam Cyclepad

Model untuk desain konseptual RGTT200KT dalam perangkat lunak Cyclepad ditunjukkan dalam Gambar 2. Model RGTT200KT mempunyai dua belas komponen (dua komponen lebih banyak dari model RGTT200K pada Gambar 1), yaitu: reaktor, *blower*, IHX, *heat exchanger* (HX), turbin-gas, kompresor, rekuperator, sirkulator B, sirkulator C, *precooler*, unit produksi gas hidrogen, dan unit desalinasi MSF. Dalam model ini terdapat enam belas buah *node* (S1-S16), untuk empat untai, yaitu untai utama A, B, C, dan D. Untai utama D adalah untai pembangkit daya listrik, sedangkan untai B dan C, masing-masing untuk memfasilitasi unit produksi hidrogen dan unit desalinasi MSF. Sedangkan untai A adalah untai yang menghubungkan reaktor nuklir dengan sistem pembangkit daya listrik secara tak langsung melalui IHX.



Gambar 3. Model GTHT300 dalam Cyclepad

Untuk validasi Cyclepad dalam pemodelan siklus Brayton dengan pendingin gas helium, digunakan desain konseptual GTHT300 yang dikembangkan oleh JAERI (sekarang JAEA)[8]. Model GTHT300 dalam perangkat lunak Cyclepad ditunjukkan pada Gambar 3.

Strategi Optimasi Desain Konseptual Sistem RGTT200x

Tujuan dari optimasi desain konseptual sistem RGTT200x adalah menyatukan spesifikasi termal teras reaktor RGTT200K dan RGTT200KT, serta meningkatkan faktor utilisasi termal dari kedua sistem tersebut. Strategi untuk menyatukan spesifikasi teras RGTT200K dan RGTT200KT adalah dengan melakukan optimasi sistem RGTT200K sehingga diperoleh sistem dengan EUF mendekati kisaran angka 80%. Selanjutnya parameter desain teras dalam sistem RGTT200K yang sudah optimal digunakan pada proses optimasi sistem RGTT200KT, dengan strategi optimasi ini diharapkan akan diperoleh sistem RGTT200K dan sistem RGTT200KT yang optimal dengan spesifikasi *thermal-flow* teras reaktor yang sama.

Analisis dan optimasi varian RGTT200x dimulai dari sistem RGTT200K karena mempunyai jumlah komponen yang lebih sedikit daripada RGTT200KT, dan diharapkan variabel yang dioptimasi menjadi lebih sedikit dan optimasi lebih sederhana. Seperti ditunjukkan dalam model pada Gambar 1, pada untai utama A terdapat tujuh buah *node* (S1-S7), oleh karena itu akan ada 14 *unknown variable* (dari temperatur dan tekanan). Parameter desain komponen sistem dianggap sebagai *known variable* karena ditetapkan sesuai dengan persyaratan dan kebutuhan desain. Saat melakukan optimasi untai A, parameter dalam *node* pada untai B dan C tidak dipertimbangkan, Cyclepad bebas memberikan asumsi nilai parameter secara otomatis. Setelah optimasi untai A selesai, berdasarkan batasan desain, parameter kondisi pada *node* tersebut dapat ditetapkan dengan mudah. Tujuan optimasi untai utama A adalah mendapatkan EUF pada kisaran angka 80% dengan cara mengatur parameter kondisi (temperatur dan tekanan) pada *node* S1 hingga S7.

Berdasarkan pertimbangan persyaratan desain, dan konstanta parameter desain yang telah ditetapkan, beberapa parameter kondisi pada *node* dapat ditentukan nilainya sehingga jumlah *unknown variable* akan berkurang. Tabel 1 menunjukkan beberapa kondisi *node* (temperatur dan tekanan) yang telah ditentukan tersebut.

Tabel 1. Data parameter kondisi node yang telah ditentukan

Parameter kondisi node	Nomor node				
	S1	S2	S4	S5	S6
Temperatur, °C	38,0	137,4	950	850	638,5
Tekanan, MPa	2,71	5,15	5,0	4,95	2,81

Sesuai kebutuhan desain produksi gas hidrogen termokimia, temperatur dan tekanan pada S4 ditetapkan 950°C dan 5 MPa. Temperatur pendingin sebelum masuk turbin gas pada S5, dengan pertimbangan kekuatan material turbin gas, ditetapkan sebesar 850°C, dan karena ditetapkan secara desain bahwa penurunan tekanan pada komponen alat penukar kalor (*heat exchanger*) sebesar 0,05 MPa, maka tekanan pada S5 menjadi 4,95 MPa. Setelah pendingin helium melalui turbin gas, tekanan dan temperatur pada S6 dapat dihitung berdasarkan parameter desain turbin yang telah ditetapkan, yaitu rasio tekanan 1,72 dan efisiensi 93%, serta persamaan konservasi dalam turbin, hasilnya seperti terlihat pada Tabel 1. Nilai temperatur S1 harus lebih-kurang lima derajat di atas temperatur ambien agar dapat menjamin perpindahan dapat berlangsung dengan baik. Temperatur 38°C untuk S1 sudah cukup memadai untuk kondisi Indonesia. Tekanan pada S1 juga dapat dihitung berdasarkan penurunan tekanan di rekuperator dan *precooler* sebagai alat penukar kalor, yaitu masing-masing sebesar 0,05 Mpa, sehingga menghasilkan tekanan 2,71 MPa. Tekanan pada S2 dapat dihitung dari hasil jumlah tekanan S3 dan penurunan tekanan rekuperator, yaitu 5,15 MPa. Selanjutnya temperatur S2 dihitung berdasarkan parameter S1 dan persamaan konservasi dalam kompresor.

Dari tujuh buah node yang ada pada untai A model RGTT200K, lima buah *node* diantaranya telah diketahui kondisinya, dengan demikian hanya tersisa dua *unknown variable*, yaitu temperatur S3 dan S7. Keduanya adalah *node* yang mengelilingi komponen rekuperator. Berdasarkan persamaan konservasi energi, asumsi bahwa kapasitas panas gas helium tidak berubah pada rentang temperature S2 hingga S6, dan selisih temperatur sisi panas (ΔT_p) dan dingin (ΔT_d) pada rekuperator, maka dapat disusun tiga buah persamaan terkait dengan temperatur S3 dan S7, yaitu sebagai berikut.

$$T_{S2} - T_{S3} + T_{S6} - T_{S7} = 0 ; \quad -T_{S2} + T_{S7} = \Delta T_d ; \quad -T_{S3} + T_{S6} = \Delta T_p \quad (3)$$

T_{S2} , T_{S3} , T_{S6} dan T_{S7} dalam persamaan (3) menunjukkan temperatur node S2, S3, S6 dan S7. Persamaan (3) mensyaratkan bahwa nilai (ΔT_p) dan (ΔT_d) harus sama. Persamaan ini merupakan persamaan aljabar linier sistem yang dapat digunakan untuk mengoptimasi model sistem RGTT200K.

Desain sistem RGTT200KT mempunyai jumlah komponen dan *node* lebih banyak dari desain sistem RGTT200K, oleh karena itu analisis dan optimasi akan melibatkan variabel yang lebih banyak. Tetapi karena spesifikasi *thermal-flow* teras dalam untai A model RGTT200KT pada Gambar 2 sudah ditetapkan dari hasil optimasi sistem RGTT200K, maka dalam analisis dan optimasi desain sistem RGTT200KT parameter pada S1, S2 dan S3 menjadi tetapan (konstanta). Langkah optimasi untai utama D pada sistem RGTT200KT menjadi serupa dengan metode optimasi untai utama A pada sistem RGTT200K. Bedanya sumber panas bukan dari teras reaktor nuklir tetapi dari IHX. Parameter kondisi (temperatur dan tekanan) pada tujuh *node* S4-S10 perlu dioptimasi agar diperoleh EUF terbaik dengan pembangkitan daya listrik tidak kurang dari 60 MWe (sesuai persyaratan dan kebutuhan desain unit pembangkitan listrik diluar JAMALI [2]).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan dari analisis ini adalah menyatukan spesifikasi termal teras reaktor RGTT200K dan RGTT200KT, serta meningkatkan faktor utilisasi termal dari kedua desain sistem tersebut. Sebelum mendiskusikan lebih dalam tentang hasil analisis dan optimasi desain konseptual RGTT200K dan RGTT200KT, perlu dikemukakan hasil validasi Cyclepad melalui pemodelan GTHTR300 dalam kondisi tunak (*steady state*). Tabel 2 menunjukkan perbandingan antara hasil pemodelan Cyclepad dan data GTHTR300 dalam acuan [8].

Tabel 2. Perbandingan hasil pemodelan Cyclepad dan data acuan GTHTR300

Node	Parameter	Nilai parameter		Kesalahan relatif (%)
		Data acuan GTHTR300[8]	Hasil pemodelan	
S1	Temperatur $^{\circ}\text{C}$	28,00	27,65	1,25
	Tekanan Mpa	3,59	3,59	0,00
S2	Temperatur $^{\circ}\text{C}$	137,00	135,50	1,09
	Tekanan Mpa	7,11	7,14	0,42
S3	Temperatur $^{\circ}\text{C}$	587,00	586,50	0,09
	Tekanan Mpa	7,00	7,00	0,00
S4	Temperatur $^{\circ}\text{C}$	850,00	850,50	0,06
	Tekanan Mpa	6,88	6,88	0,00
S5	Temperatur $^{\circ}\text{C}$	618,00	618,00	0,00
	Tekanan Mpa	3,68	3,65	0,82
S6	Temperatur $^{\circ}\text{C}$	167,00	167,00	0,00
	Tekanan Mpa	3,61	3,61	0,00
	Laju alir masa kg/det	439,00	439,00	0,00
	Daya listrik MWe	275,00	282,70	2,80
	Efisiensi termal %	45,80	45,28	1,14

Perbandingan parameter dalam Tabel 2 menunjukkan bahwa hasil pemodelan Cyclepad mempunyai kesalahan relatif terbesar 2,8%. Kesalahan ini kurang dari 3%, dan karena itu masih berada dalam batas dapat ditolerir. Secara keseluruhan, Tabel 2 menunjukkan bahwa Cyclepad layak dan memadai untuk digunakan sebagai alat (*tool*) dalam analisis sistem RGTT dengan siklus Brayton untai tertutup berpendingin gas helium.

Varian sistem RGTT200x dikembangkan dengan mengacu pada GTHTR300[8], dan desain terasnya mengacu pada HTR-Module[10] berbahan bakar bola yang didalamnya terdapat partikel TRISO. Perbedaan signifikan antara teras RGTT200x dan HTR-Module adalah pada geometri partikel TRISO[11].

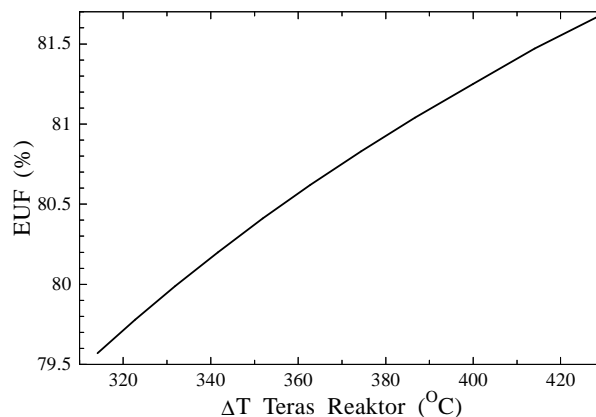
Analisis dan Optimasi Sistem RGTT200K

Analisis dan optimasi varian RGTT200x dimulai dari sistem RGTT200K karena mempunyai jumlah komponen yang lebih sedikit daripada RGTT200KT, dan dengan demikian diharapkan variabel yang dioptimasi menjadi lebih sedikit serta optimasi lebih sederhana.

Persamaan (3) menjadi dasar optimasi desain konseptual sistem RGTT200K. Persamaan (3) mensyaratkan bahwa nilai (ΔT_p) dan (ΔT_d) harus sama. Berdasarkan pertimbangan pada standar TEMA[13] nilai $\Delta T_p = \Delta T_d$ sebaiknya lebih besar dari 5°C , karena beda temperatur ini dianggap sudah mencukupi untuk kelangsungan perpindahan panas melalui dinding pipa rekuperator setebal 1-3 mm. Nilai $\Delta T_p = \Delta T_d$ yang lebih tinggi

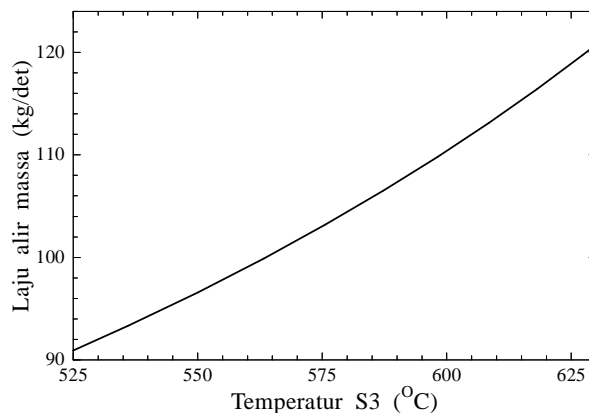
akan lebih baik karena semakin dapat menjamin perpindahan panas akan berlangsung dengan baik.

Persamaan (3) menunjukkan bahwa untuk dua *unknown variable*, temperatur S3 dan S7, sebenarnya hanya satu parameter saja yang benar-benar tak diketahui. Karena jika salah satu parameter (temperatur S3 atau S7) ditetapkan maka parameter yang lain dapat dihitung dengan persamaan (3).



Gambar 4. Pengaruh ΔT teras reaktor terhadap EUF sistem RGTT200K

Sesuai dengan teori termodinamika siklus Brayton[12], peningkatan EUF siklus dapat dicapai dengan menaikkan harga perbedaan temperatur antara S3 dan S4 (ΔT teras reaktor), seperti ditunjukkan dari hasil analisis sensitivitas pada Gambar 4. Oleh karena temperatur S4 telah ditetapkan, maka peningkatan nilai ΔT teras dicapai dengan menurunkan temperatur S3. Tetapi perlu diingat bahwa nilai ΔT teras yang terlalu besar akan menimbulkan tegangan termal (*thermal stress*) pada material struktur teras reaktor, oleh karena itu penurunan temperatur S3 ada batasnya. Desain HTR-Module mempunyai beda temperatur teras sebesar 450°C [13], dengan menetapkan ΔT teras lebih kecil dari 450°C , maka teras RGTT200K akan lebih aman dari teras HTR-Module karena akan mempunyai tegangan termal yang lebih rendah.



Gambar 5. Grafik temperatur pendingin masuk teras vs laju alir massa pendingin

Penetapan temperatur S3, akan mengakibatkan variabel pada semua *node* (S1-S7) dapat dihitung, dan optimasi dapat dilakukan cukup dengan memilih temperatur S3 serendah-rendahnya sesuai dengan batas-batas keselamatan teras reaktor dan kebutuhan desain, hingga dicapai nilai EUF setinggi mungkin. Tetapi, sesuai dengan persamaan konservasi energi, penurunan temperatur S3 akan membawa konsekuensi pada penurunan laju alir massa helium pada teras reaktor, seperti ditunjukkan dalam grafik pada Gambar 5. Perubahan laju alir massa pendingin berpengaruh secara global pada enam komponen pada untai A, karena laju alir massa pendingin pada setiap komponen akan berubah mengikuti laju alir massa pendingin dalam teras reaktor. Keadaan ini akan mengubah tatanan parameter kondisi secara keseluruhan sistem, baik dalam komponen maupun *node* pada saat optimasi dilakukan. Oleh karena itu, strategi optimasi sistem diubah, dari mengatur temperatur S3 yang bersifat lokal menjadi mengatur laju alir massa pendingin dalam untai A yang bersifat global. Pengaturan laju alir massa disesuaikan sedemikian rupa sehingga temperatur S3 turun hingga temperatur terendah, tetapi menghasilkan beda temperatur teras yang masih berada pada rentang daerah aman dari tegangan termal berlebihan dan persyaratan/kebutuhan desain terpenuhi.

Untuk mendapatkan konstruksi turbin-kompresor poros tunggal yang sederhana dengan keandalan tinggi, dalam optimasi EUF sistem RGTT200K, rasio perbandingan tekanan pada turbin gas dan kompresor dibatasi agar tidak melebihi nilai dua. Dengan cara ini akan diperoleh turbin gas dan kompresor satu *stage* yang konstruksinya lebih sederhana, tetapi tetap akan dapat menghasilkan sistem dengan EUF yang cukup tinggi.

Dari analisis sensitivitas, dapat diketahui pengaruh perubahan nilai laju alir massa pendingin gas helium yang mengalir dalam untai A terhadap temperatur masuk teras, beda temperatur pendingin masuk-keluar teras, pembangkitan daya termal untuk unit produksi hidrogen dan unit desalinasi, pembangkitan daya listrik, dan EUF. Hasil perhitungan analisis sensitivitas tersebut ditunjukkan pada Tabel 3. Perhitungan EUF pada Tabel 3 dilakukan dengan mengambil efisiensi termal produksi hidrogen 52% [14], dan desalinasi 88% [15].

Tabel 3. Pengaruh perubahan laju alir massa pendingin terhadap parameter penting RGTT200K

Laju alir masa (kg/det)	T _{in} teras reaktor (°C)	ΔT teras reaktor (°C)	Daya termal produksi H ₂ (MWt)	Daya listrik (MWe)	Daya termal Desalinasi MSF (MWt)	EUF (%)
90,0	520,74	429,26	48,33	44,59	106,40	81,68%
93,3	535,92	414,08	50,10	46,61	102,58	81,47%
96,6	550,07	399,93	51,88	48,64	98,75	81,25%
99,9	563,28	386,72	53,65	50,66	94,92	81,04%
103,2	575,64	374,36	55,42	52,69	91,09	80,83%
106,5	587,24	362,76	57,19	54,71	87,26	80,62%
109,8	598,15	351,85	58,96	56,74	83,44	80,41%
113,1	608,41	341,59	60,74	58,76	79,61	80,20%
116,4	618,10	331,90	62,51	60,79	75,78	79,99%
119,7	627,25	322,75	64,28	62,81	71,95	79,78%
123,0	635,91	314,09	66,05	64,84	68,12	79,57%

Tabel 2 menunjukkan bahwa seiring dengan penurunan laju alir massa pendingin, beda temperatur teras dan EUF naik. Tetapi peningkatan nilai beda temperatur teras akan menyebabkan tegangan termal teras meningkat, demikian juga temperatur pusat bahan bakar akan semakin panas karena pengambilan panas yang lebih lambat akibat penurunan laju alir massa pendingin helium. Nilai EUF dapat melebihi 80% apabila laju alir massa diturunkan secara berlanjut, tetapi dengan konsekuensi produksi daya listrik yang rendah.

Dengan interpolasi data pada Tabel 3, diketahui bahwa laju alir 114 kg/det, menghasilkan EUF 80,14% dan daya listrik 60,22 MWe. Usaha peningkatan EUF lebih lanjut akan berdampak negatif, yaitu penurunan daya listrik. Sementara itu daya listrik sebesar 60,22 MWe yang dihasilkan RGTT200K sangat cocok dengan kondisi di luar Pulau Jawa, karena pada satu dekade ke depan beban puncak rata-rata jaringan listrik akan mencapai 300 MWe[16], dan 20% dari beban puncak tersebut adalah 60 MWe. Teori jaringan daya listrik mensyaratkan bahwa untuk menjaga stabilitas jaringan, satu unit pemasok daya tidak boleh memasok daya melebihi 20% dari beban puncak pada suatu jaringan listrik. Berdasarkan persyaratan ini, pembangkitan daya listrik sebesar 60 MWe adalah merupakan nilai pembangkitan optimal-maksimal yang dapat diterima oleh jaringan listrik di luar Jawa-Madura-Bali dengan beban puncak rata-rata 300 MWe.

Faktor pemanfaatan energi termal setinggi 80,14% sudah cukup efisien, ramah lingkungan (karena pembuangan panas ke lingkungan kurang dari 20%) dan meningkat secara signifikan dari hasil litbang yang telah dilaporkan[2], yaitu 63%. Dengan laju alir massa 114 kg/det, sistem RGTT200K akan menghasilkan energi termal untuk produksi gas hidrogen dan desalinasi masing-masing sebesar 61,22 MWt dan 78,56 MWt. Energi tersebut dapat digunakan untuk produksi gas hidrogen dan air bersih dengan kapasitas produksi 216,474 N-m³/hari dan 60,146 ton/hari.

Hasil pemodelan Cyclepad ditunjukkan dalam bentuk distribusi temperatur dan tekanan semua *node* pada sistem RGTT200K pada Tabel 4.

Tabel 4. Distribusi temperatur dan tekanan seluruh node pada model RGTT200K

Parameter	Node												
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Temperatur, °C	38,0	137,4	611,1	950,0	850,0	638,5	164,3	670,0	678,3	900,0	30,0	34,61	120,0
Tekanan, MPa	2,71	5,15	5,10	5,00	4,95	2,81	2,76	5,05	5,15	5,10	2,90	3,00	2,95

Tabel 5 menunjukkan spesifikasi *thermal-flow* teras RGTT200K yang diperoleh dari simulasi model dengan Cyclepad. Spesifikasi *thermal-flow* teras RGTT200K ini juga akan digunakan pada pemodelan sistem RGTT200KT, dengan demikian varian RGTT200x akan mempunyai teras reaktor dengan spesifikasi *thermal-flow* yang sama.

Tabel 5. Spesifikasi *thermal-flow* teras RGTT200K hasil simulasi Cyclepad

Tipe RGTT	Spesifikasi <i>thermal-flow</i> teras reaktor RGTT200K dan RGTT200KT							
	Tin (°C)	Tout (°C)	Laju alir massa (kg/det)	Beda entalpi (kJ/kg)	Beda tekanan (MPa)	Panas spesifik (kJ/kg)	Beda entropi (kJ/kg.K)	Daya termal (MWt)
RGTT200K	611,1	950	114	1754	-0,10	1754	1,72	200

Analisis dan Optimasi Sistem RGTT200KT

Jumlah komponen dan *node* sistem RGTT200KT lebih banyak dari sistem RGTT200K, oleh karena itu analisis dan optimasi akan melibatkan variabel yang lebih banyak. Tetapi karena strategi optimisasi dilakukan dengan menyamakan spesifikasi *thermal-flow* teras RGTT200K dan RGTT200KT, maka kondisi nodal dalam untai A pada Gambar 2 sudah ditetapkan dari hasil optimasi sistem RGTT200K, dan oleh karena itu parameter pada S1, S2 dan S3 menjadi konstanta. Selanjutnya langkah optimasi untai utama D pada sistem RGTT200KT menjadi serupa dengan metode optimasi untai utama A pada sistem RGTT200K. Dari tujuh *node* yang ada (S4-S10), hanya temperatur pada S6 dan S10

saja yang belum diketahui, tetapi begitu salah satu dari dua parameter tak diketahui ini ditetapkan, maka dengan menggunakan persamaan yang serupa dengan persamaan (3), yang diturunkan berdasarkan kondisi *node* di sekitar Rekuperator RGTT200KT, parameter yang lain dapat dihitung.

Strategi optimasi untai D sistem RGTT200KT sama dengan optimasi pada sistem RGTT200K, yaitu dengan mengatur laju alir massa pendingin gas helium untuk mendapatkan EUF yang memadai dan daya listrik yang optimal, yaitu tidak kurang dari 60 MWe. Hasil analisis sensitivitas pengaruh laju alir pendingin terhadap beberapa parameter penting ditunjukkan pada Tabel 6. Dari interpolasi data dalam Tabel 6, diperoleh pembangkitan daya listrik sebesar 60,87 MWe pada laju alir massa pendingin 124 kg/det. Pada kondisi laju alir massa ini, RGTT200KT menghasilkan daya termal untuk unit produksi gas hidrogen termokimia dan unit desalinasi MSF masing-masing sebesar 52,42 MWt dan 86,71 MWt. Daya termal ini mampu memproduksi gas hidrogen dan air bersih dengan kapasitas 185,357 N-m³/hari dan 66,385 ton/hari.

Tabel 6. Pengaruh perubahan laju alir massa pendingin pada parameter penting RGTT200KT

Laju alir massa (kg/det)	T _{in} IHX (°C)	ΔT IHX (°C)	Daya termal produksi H ₂ (MWt)	Daya listrik (MWe)	Daya termal Desalinasi MSF (MWt)	EUF (%)
90,0	480,20	449,80	38,04	38,51	123,45	79,36%
93,8	498,43	431,57	39,65	41,01	119,34	79,21%
97,6	515,23	414,77	41,26	43,51	115,23	79,06%
101,4	530,77	399,23	42,86	46,01	111,13	78,91%
105,2	545,19	384,81	44,47	48,51	107,02	78,76%
109,0	558,61	371,39	46,07	51,01	102,92	78,61%
112,8	571,12	358,88	47,68	53,51	98,81	78,46%
116,6	582,82	347,18	49,29	56,01	94,71	78,31%
120,4	593,77	336,23	50,89	58,51	90,60	78,16%
124,2	604,06	325,94	52,50	61,01	86,49	78,01%
128,0	613,74	316,26	54,11	63,51	82,39	77,86%

Tabel 7. Distribusi temperatur dan tekanan seluruh *node* pada model RGTT200KT

Parameter	Node							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Temperatur, °C	611,1	950,0	966,2	38,0	131,8	603,5	930,0	850,0
Tekanan, MPa	5,10	5,00	5,15	2,88	5,30	5,25	5,20	5,25
Parameter	Node							
	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
Temperatur, °C	638,0	166,3	550,0	557,1	900,0	30,0	34,5	120,0
Tekanan, MPa	2,98	2,93	5,15	5,25	5,20	2,95	3,05	3,00

Terlihat dalam Tabel 6 bahwa EUF sistem RGTT200KT sangat sulit untuk dapat mencapai 80%. Untuk itu pertimbangan utama yang dipakai dalam optimasi sistem RGTT200KT ini adalah besarnya pembangkitan daya listrik, yaitu tidak lebih rendah dari 60 MWe. Distribusi temperatur dan tekanan untuk seluruh *node* pada sistem RGTT200KT ditunjukkan pada Tabel 7. Dengan distribusi tekanan dan temperatur seperti yang

ditunjukkan pada Tabel 7, EUF dapat mencapai 78,02%. EUF ini lebih rendah 2,12% bila dibandingkan dengan EUF RGTT200K.

KESIMPULAN

Telah dilakukan optimasi terhadap desain sistem RGTT200K dan RGTT200KT dengan menggunakan perangkat lunak Cyclepad. Analisis dan optimasi RGTT200K dan RGTT200KT menghasilkan spesifikasi *thermal-flow* yang sama untuk teras reaktor, dengan demikian satu desain teras reaktor dapat digunakan untuk kedua varian desain RGTT ini. Selain itu, optimasi ini menghasilkan sistem RGTT dengan faktor utilisasi termal (EUF) yang lebih baik dari pada desain-desain sebelumnya[2,3], yaitu dari 63% menjadi 80,14% untuk RGTT200K dan dari 63,6% menjadi 78,02% untuk RGTT200KT.

Optimasi desain sistem RGTT200K dengan siklus Brayton langsung menghasilkan sistem yang dapat membangkitkan listrik sebesar 60,22 MWe, dan menghasilkan daya termal untuk produksi gas hidrogen sebesar 61,22 MWt. Panas sisa yang dibuang melalui perangkat *precooler* dapat memasok daya termal untuk desalinasi dengan teknologi MSF sebesar 78,56 MWt. RGTT200K ini akan memanfaatkan energi termal sebesar 80,14% dan sisanya dibuang ke lingkungan. Desain konseptual RGTT200K akan mampu menghasilkan gas hydrogen dan air bersih sebesar 185,357 N-m³/hari dan 66,385 ton/hari.

Optimasi terhadap sistem RGTT200KT dengan siklus Brayton tak langsung yang dirancang untuk meningkatkan kemandirian operasi dan perawatan menghasilkan sistem RGTT yang mampu membangkitkan listrik 60 MWe, menghasilkan daya termal untuk produksi gas hidrogen sebesar 52,42 MWt, dan untuk desalinasi 86,71 MWt. Desain sistem RGTT200KT ini mempunyai faktor utilisasi termal sebesar 78,02%. Nilai EUF RGTT200KT lebih kecil 2,12% dari EUF pada RGTT200K.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan litbang ini adalah bagian dari Program Insentif Riset Terapan RT-2011-0494 dengan judul Pengembangan Reaktor Gas Temperatur Tinggi 200 MWt Untuk Kogenerasi yang mendapat pendanaan selama tahun 2011 dari Kementerian Riset dan Teknologi. Untuk itu kami mengucapkan terima kasih atas dukungan pendanaan ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim. Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2010-2014. Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2010.
2. Purwadi M.D. Desain konseptual sistem reaktor daya maju kogenerasi berbasis RGTT. Proseding Seminar TKPFN-16 Surabaya, ITS-Surabaya, 2010.
3. Purwadi M.D. desain konseptual sistem RGTT 200 MWt siklus tak langsung. Proseding Seminar TKPFN-17 Yogyakarta, UNY-Yogyakarta, 2011.
4. Bhattacharyya S. Examining stage enhancements for thermodynamic cycles to improve performance using an intelligent instruction software. Int. J. Engng. Ed. 2000; 16: 340-350.

5. Wu C. and Carr M.A. Intelligent computer-aided design optimization of heat pumps. *Journal of the International Society for Structural and Multidisciplinary Optimimization (ISSMO)* Springer-Verlag. 2003; 24: 457-463.
6. Wu C., Puzinauskas P.V., and TSAI J.S. Performance analysis and optimization of a supercharged Miller Cycle Otto Engine. *Applied Thermal Engineering*. 2003; 23: 511-521.
7. Ai H. et.al. Exploring the effectiveness of social capabilities and goal alignment in computer supported collaborative learning. *Proceeding of 10th International Conference in Intelligent Tutoring System, ITS 2010 Part II, LNCS 6095* p134-143, USA, June 2010, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
8. Kunitomi K., et.al. Research and development for gas turbine system in GTHTR300. *JSME International Journal, Series B*. 2004; 47.
9. WU C. *Thermodynamics and heat power cycles*. Nova Science Publisher Inc., New York, 2007.
10. Lohnert G. Technical design features and essential safety-related properties of the HTR-Module, *Nuclear Engineering and Design*. 1990; 121:259-275.
11. Zuhair dkk. Studi efek fraksi packing triso dalam desain kritikalitas RGT200K. *Prosiding Seminar TKPFN-17 Yogyakarta, UNY-Yogyakarta*, 2011.
12. Fiorini P., Sciubba E. Thermoeconomic analysis of a MSF desalination plant. *Desalination*. 2005; 185: 39-51.
13. Anonymous. Standards of the exchanger manufacturers association 9th Edition. *Tubular Exchanger Manufacturers Association Inc.*, New York; 2007.
14. Brown L.C. et.al. High efficiency generation of hydrogen fuel using nuclear power. GA-A24285, *Nuclear Energy Research Initiative (NERI) Program for US-DOE*; 2003.
15. Al-Hengari S. et.al. Performance analysis of a MSF desalination unit. *Desalination*, Elsevier 2005;182: 73–85.
16. Anonim. Rencana usaha penyediaan tenaga listrik PT PLN (Persero) 2011-2020”, PT PLN (Persero), ISBN 978-979-1203-16-6, 2011.